

## 液体燃料の表面蒸発燃焼に関する基礎実験(第2報)

その他（別言語等） のタイトル	A Study of Combustion on the Heated Surface Sprayed with Liquid Fuel (2)
著者	赤木 盈, 林 重信, 塚原 実
雑誌名	室蘭工業大学研究報告
巻	4
号	2
ページ	393-408
発行年	1963-06-30
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10258/3186">http://hdl.handle.net/10258/3186</a>

# 液体燃料の表面蒸発燃焼に関する基礎実験 (第2報)

赤木 盈\*・林 重信・塚原 実\*\*

## A Study of Combustion on the Heated Surface Sprayed with Liquid Fuel (II)

Mitsuru Akagi, Shigenobu Hayashi, Minoru Tsukahara

### Abstract

The "Diesel Knocking" often occurs on a Diesel engine, When much fuel is injected in a combustion chamber before the fuel is autoignited, especially in the case of a Diesel engine of direct injection type.

In this case the rate of pressure rising  $dp/da$  in the combustion chamber becomes very high and the engine runs roughly. It was desirable long ago that the injected fuel did not contact with the surface of a combustion chamber wall.

Recently, however, Meurer (M. A. N) has made the engine which makes mixture gas by evaporating the injected fuel at the surface of the combustion chamber wall, causing slow combustion. He reports that such an engine runs smoothly. Here, attention must be given to the fact that the direction of fuel injection, the temperature of combustion chamber wall and velocity of the air in the combustion chamber sensitively affect the character of that engine.

As the first step, we had calculated an evaporating time (life time) of fuel film on the heated surface, from an evaporating time of fuel drops, which data had been obtained before.

Next, we have examined to find the area and thickness of film on the wall, according to the nozzle-angle and its distance to the wall. we have obtained the life time of this film, as the following report.

### I ま え が き

従来のディーゼル機関において、もっとも要求されることは、騒音、振動の防止と回転の円滑化にあるが、M. A. N社によって開発された Meurer 機関はこれらの解決の緒と考へられる。

従来のディーゼル機関の燃焼過程からみて、異なる考えを有する Meurer 機関は燃焼学的見地から種々複雑な問題を含むと考へられるが、その根幹なすものは燃焼室壁面に於ける燃料の蒸発であると思へられ、ディーゼル機関において、Meurer 燃焼の燃焼原理を解明することは、静かなるディーゼル機関の開発に益する処大なりと思われる。

前報告において、主として燃料油滴の熱せられた壁面における蒸発について観察を行つたが、

\*玉川大学工学部教授

\*\*苫小牧工業高等学校教諭

本報告には、蒸発に大きな関連を有すると思はれる噴射ノズルから燃焼室内に噴射される燃料の噴射角度、燃料油膜の附着面積およびその厚さ、蒸発時間すなわち燃焼時間に関する実験をここに報告する。この実験はあくまでも基礎的な研究実験であり、更に検討の上実際機関での実験を行ふ予定である。

## II 実験装置および実験方法

### 1) 噴射量と附着量の関係

ノズルから噴射された燃料が壁面にあたった場合、一部は壁面に反射して空気中に浮遊し、一部は壁面到達以前に速度を失いそのまま反射した燃料と合って混合気を形成する、その他の部分は壁面に附着して、諸種の条件のもとで蒸発を始める。一回の全噴射量に対する浮遊または壁面へ附着する割合は、噴射速度（噴射圧力に関係する）および燃料の種類によつて異なることは勿論であるが、ノズルと壁面のなす角度および距離によつて大きく支配されると考へるので図一1に示す装置を使用して平板に於ける場合と、図一2による円管を使用して壁面附着量を測定した。使用した噴射ポンプはボツシユA型単筒用ポンプで、ノズルはジーゼル機器N DN4SDピントルノズルを、燃料は日本石油製A重油を使用した。

一回の全噴射量を予め知るため、重量既知の脱脂綿に5回宛噴射させたもの30個を精密天秤にて秤量しその $1/5 \times 1/30$ を一回の噴射量とした。その値は101mgである。

つぎに壁面に重量既知の薬色紙を密着させ、ノズルの噴射軸方向が壁面におけるノルマル方向に対してなす角度を変化させ、その各々について到達距離を変化させて噴射させ、燃料が薬包紙に附着した量を精密天秤にて秤量その平均値を各々その条件について求めた。

平板における角度および距離の設定は、垂直方向を $0^\circ$ として $15^\circ$ 間隔で $60^\circ$ まで変化させ、その各々について到達距離を15mmから10mm間隔で55mmまで5段階にわけて測定した。円管においては中心点を通る方向を $0^\circ$ として $10^\circ$ 間隔で角度を変化させたが、この場合の到達距離は、噴射方向角および同筒の直径によつて決つてくる。

すなはち距離 $l$ は、

$$\text{平板の場合} \quad l = h \cos \alpha$$

$$\text{円管の場合} \quad l = 2r \cos \alpha$$

ここで、 $h$ :平面からノズルまでの高さ  $r$ :円管の半径  $\alpha$ :傾斜角度

### 2) 附着面積の測定

前報告<sup>4)</sup>において燃料が壁面に附着した際、その速度および粘性などによつて押し拡げられ、其の後表面張力の働きによつて一定面積を保つことを知つた。附着面積の測定にはこの安定状態を使用した。図一1、図一2に示す通り反射板に印画紙を密着させ、その上を薬包紙で覆い、

直接印画紙に燃料が当らぬ様にしてこれに燃料を附着させて、噴射ポンプのカムアングルに任意に同期させ得るクセノン放電管ストロボフラッシュにてこれを照射して燃料の附着部分以外を感光せしめ、その写影をプランメーターで1枚につき3回測定したもの5枚の平均値を附着面積として求めたが予期以上の好結果が得られた。

また（燃焼室内の）渦流の影響をしらべるために、平板の場合のみ図-1の装置を風洞の中へ入れて、これに整流された空気流を送ってその附着量、附着面積を前述の方法で測定したが、その写影を写真-1に示す。油膜厚さは附着量、附着面積から算定してその平均値をもつて表した。

$$\text{すなわち} \quad d = \frac{m}{s \cdot \rho}$$

$d$  : 油膜平均厚さ     $m$  : 附着重量     $s$  : 附着面積     $\rho$  : 燃料比重

附着面全体にわたって油膜厚さは均一ではないが、あくまでこの値は一樣の厚さをもつものと考えた平均値である。

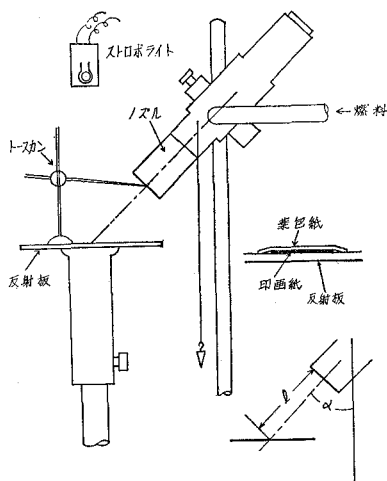


図-1 平板実験装置

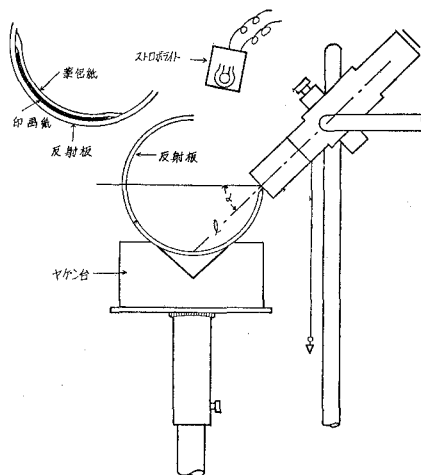


図-2 円管実験装置

### 3) 蒸発時間の測定

燃焼室壁面に附着した燃料油膜が燃焼室で気化するのは壁面からの熱伝達によるもの、渦流空気の流れによるものと、焰の発する輻射熱による一種のマス・トランスファーであると考えられる。本実験においては空気渦流を無視して図-3、図-4に示す方法で反射板の下側にマイカによつて絶縁したニクロム線で加熱して、これに燃料を噴射し、蒸発によつて形成された混合気を燃焼させて火焰の光輝をフォトトランジスターを通して電磁オシロで記録し燃焼時間を測定することにより蒸発時間を間接的に求めようとした。一方同時に高速度カメラにて3000

p.p.s. の速度でこれを撮影，燃焼時間を測定したが両者はよく一致した。この燃焼過程を写真—3 写真—4 に示す。壁面温度の測定は図—5 に示す様に C.A. 熱電対を埋めた表面温度測定器を作成，ポテンシヨメーターにて測定した。板の中央部分と外周辺での温度分布は異なるが，燃料の附着する中央部分での偏差は $\pm 5^{\circ}$ 以内に納まった。

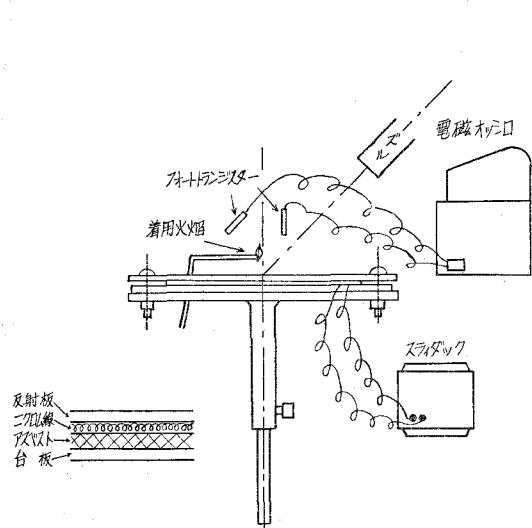


図-3 平板蒸発測定装置

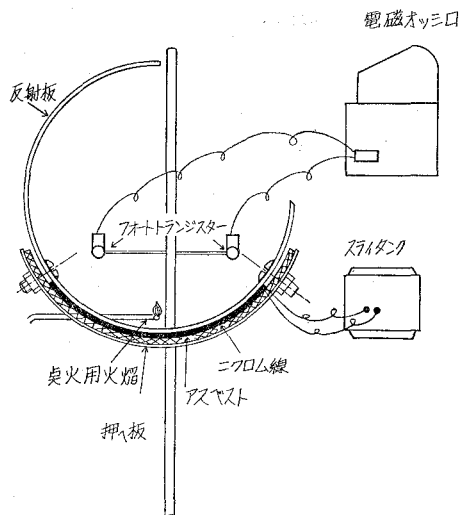


図-4 円管蒸発測定装置

### III 結果および考察

#### 1) 燃料の附着量および油膜平均厚さ

燃焼室壁面での燃料油膜の状態を知るために，先ず考えなければならないのは，壁面の温度，燃料油膜の受熱面積とその厚さである。我々は先ず，燃焼室内におこる渦流空気を見無視して，平らな壁面に対して燃料を噴射する際の角度および距離を変化させることによって，その附着重量がいかなる影響を受けるかについて，噴射角度と平板のなす角度 $0^{\circ}$ ， $15^{\circ}$ ， $30^{\circ}$ ， $45^{\circ}$ ， $60^{\circ}$ ，の各々について距離を 15mm, 25mm, 35mm, 45mm, 55mm, と変化させて測定した結果を図—6 に示す。これから噴射角が小さい間は距離の増大と共にその附着量は増し， $30^{\circ}$ ， $45^{\circ}$ あたりまでは初め距離とともに僅か増し，以後下降する傾向にあり，角度が大きくなると距離に支配されない。 $70^{\circ}$ ， $80^{\circ}$ において15mm～55mmの間で附着量の変化は程んど見られず僅か10%～15%の附着率を示した。

距離をパラメーターとして，噴射角度と附着率の関係を図示すれば図—7 の如くなり噴射方向角度が小さい程附着量は大きくなる。これは噴霧の拡がり角度の影響と考へられ，噴霧角が大

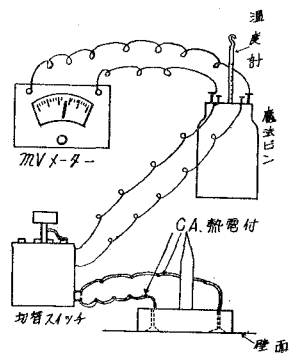


図-5 壁面温度測定装置

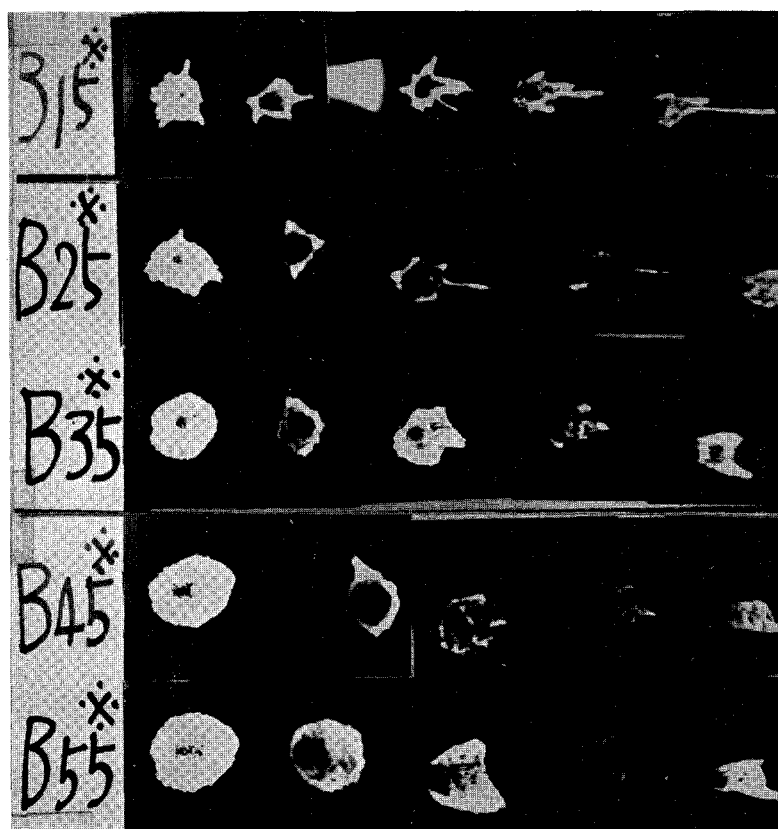


写真-1 距離一定の場合の附着面積  
(平版有風)

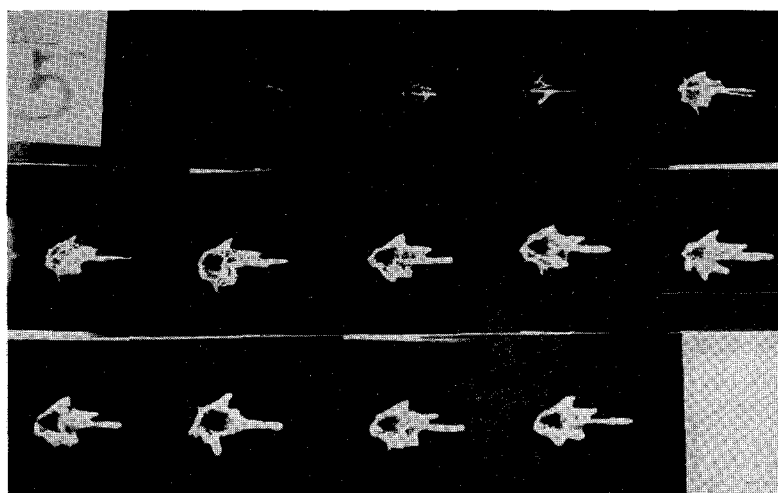


写真-2 附着面積の推移  
(平版無風)

写真-3 重油の蒸発・燃焼 (平板上)

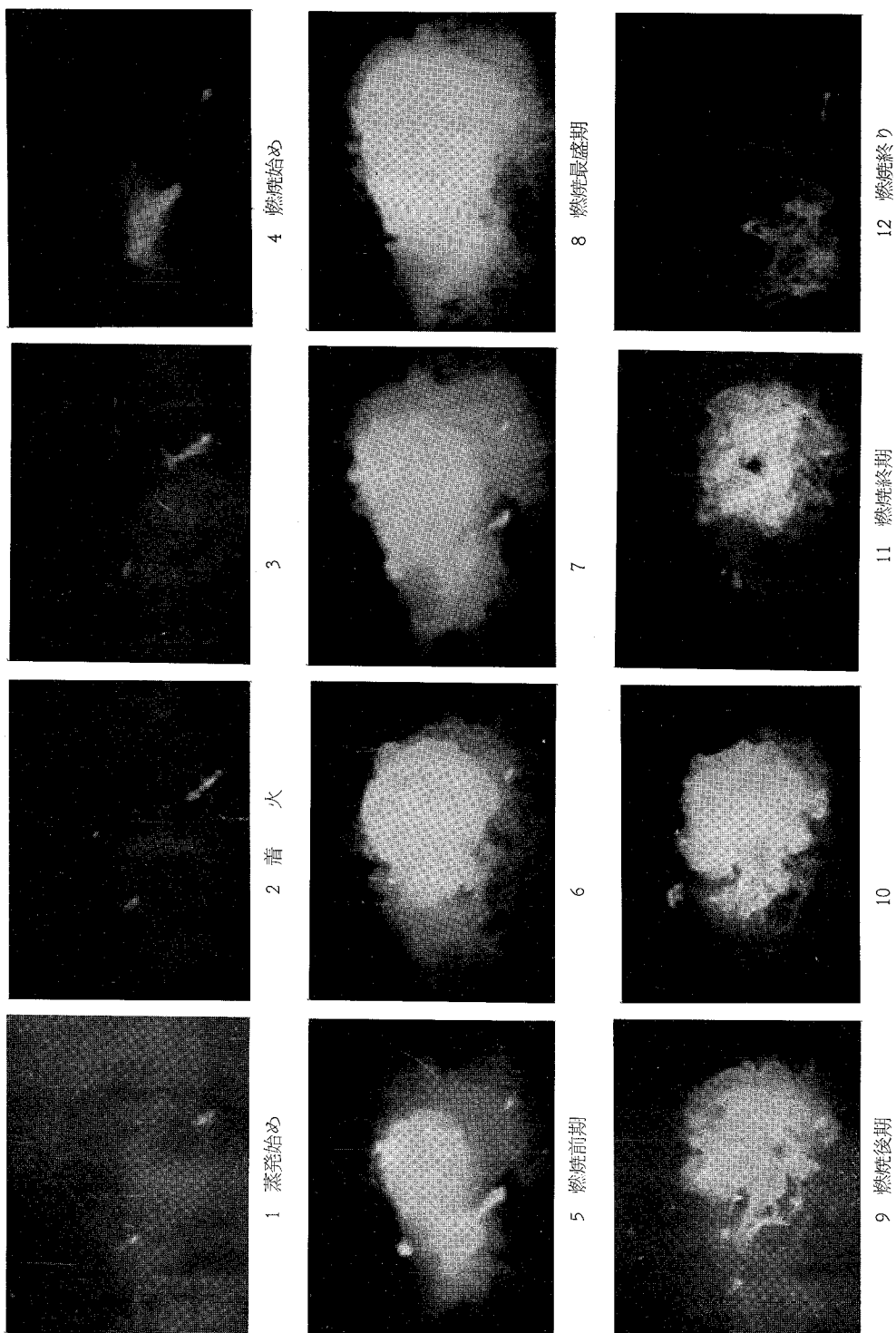
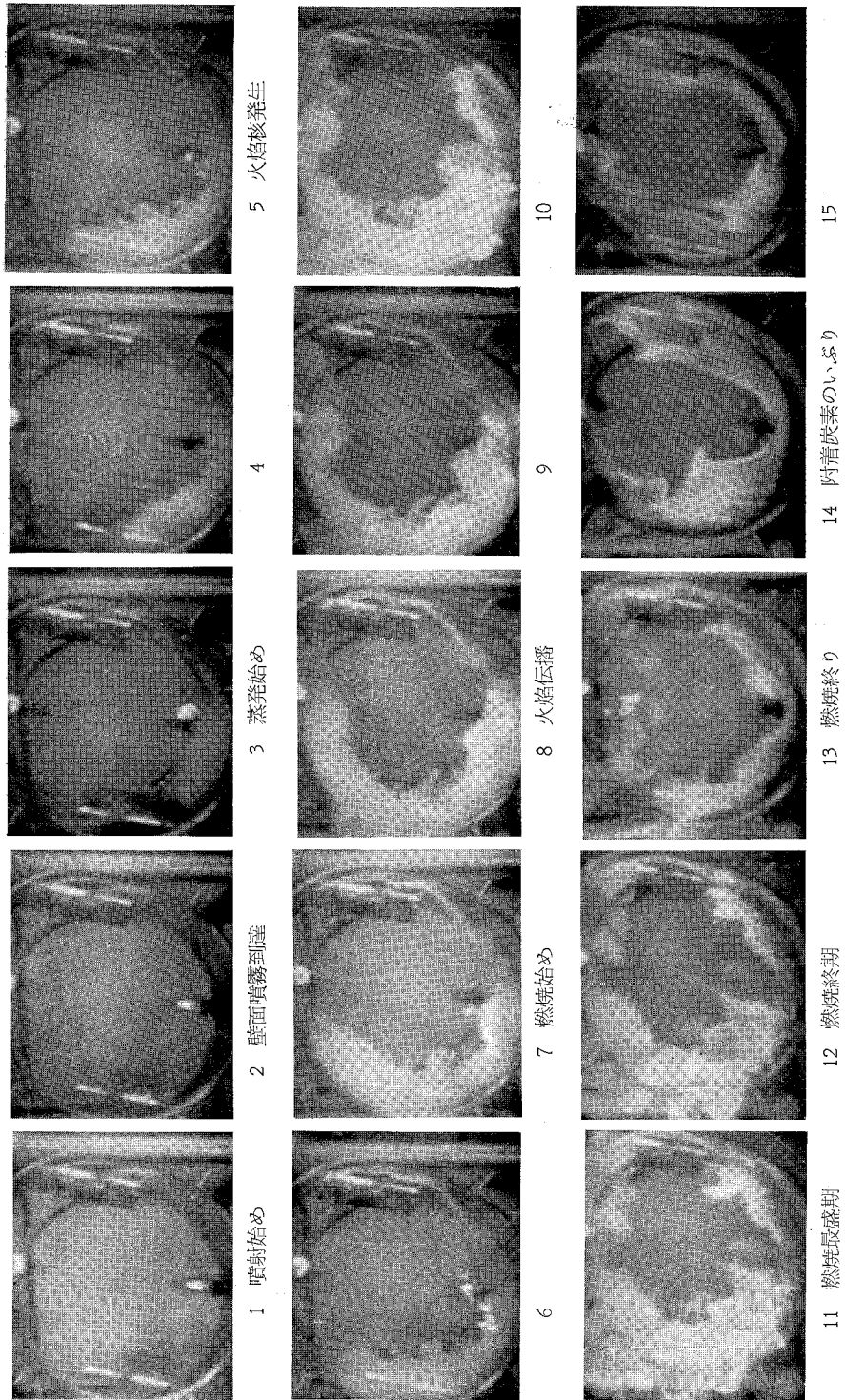


写真-4 重油の蒸発燃焼（円管）





であると噴射角の増大でますます附着量は減少して来るものと思われる。

また距離に関しては距離が大となると噴霧粒子のもつ速度エネルギーの急激な低下で反射力が激減するためである。この点に関し Meurer 氏の設計と矛盾を生ずることとなるが、実際機関の場合は、燃焼室内の大きな渦流により、その遠心力による壁面への押しつけ効果が相当影響するためと考えられ、渦流と噴射方向との関連が相当重要となつて来ることが分る。したがって渦流の速度に対し適当な噴射角度が存在するものと推察される。

また燃量附着面積についても同様の方法で角度および距離を変化させて測定したが、結果を図示すれば図—8、図—9の如くである。噴射角度を一定として距離を変化させた場合、面積は距離にやや比例して増加するが、その増加率は $0^\circ$ のときがもっとも大きな値を示している。 $70^\circ$ 、 $80^\circ$ については附着状態が悪く面積の測定は不可能であつた。又一定距離における噴射方向角の変化に対して、垂直方向および $30^\circ$ のときに各距離における附着面積の差は大きく、他の角度での差は僅かであつた。 $15\text{mm}$ と $55\text{mm}$ の角度 $0^\circ$ における差は約2倍の値を示している。

油膜厚さに関しては、前述の通り測定が不可能であるので、以上の燃量附着量および附着面積から平均厚さを算定して得た結果図—10、図—11の如くなる。

空気流中での実験では、その速度と附着率および附着面積を測定して、これらの関係を求め、その結果を図—12、図—13に示す。装置の関係上ノズルと壁面のなす距離が小さいときおよび噴射角度が大きいときには、流れがノズルに遮げられ、またノズル附近に層流ながれの“渦流”が考へられ、使用した送風機の能力の限界のため流速は $17\text{m/s}$ より得ることが出来ず望ましい結果を得ることは出来なかったが、附着重量は無風時に対して $30\%\sim 50\%$ の減少を示すのに対し、附着面積では逆に、距離が大きい場合約 $30\%$ の増加がみられ距離の少ない場合はほとんど

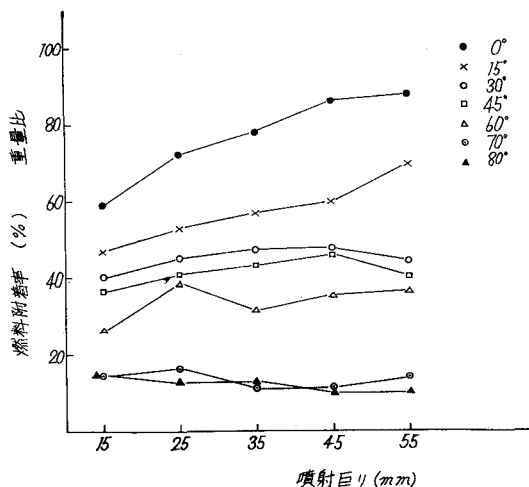


図-6 平板無風時に於ける  
噴射巨り及び角度が及ぼす附着率

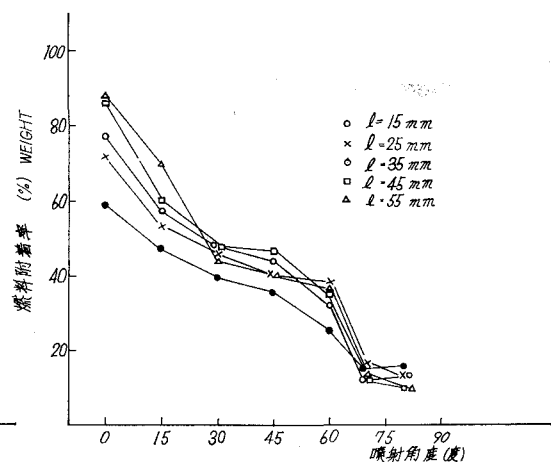


図-7 平板無風状態に於ける  
噴射角度に対する燃料附着率

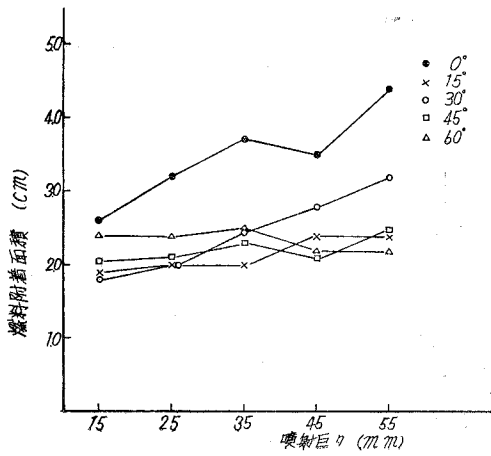


図-8 平板無風時に於ける  
噴射巨りに対する附着面積

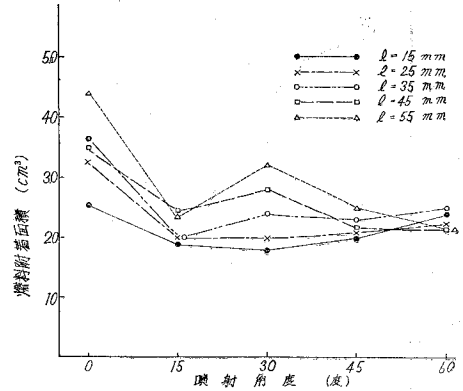


図-9 平板無風時に於ける噴射角度と附着面積

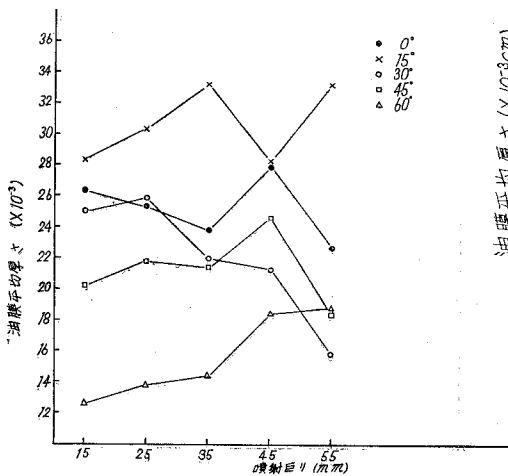


図-10 平板無風時に於ける距離と油膜平均厚さ

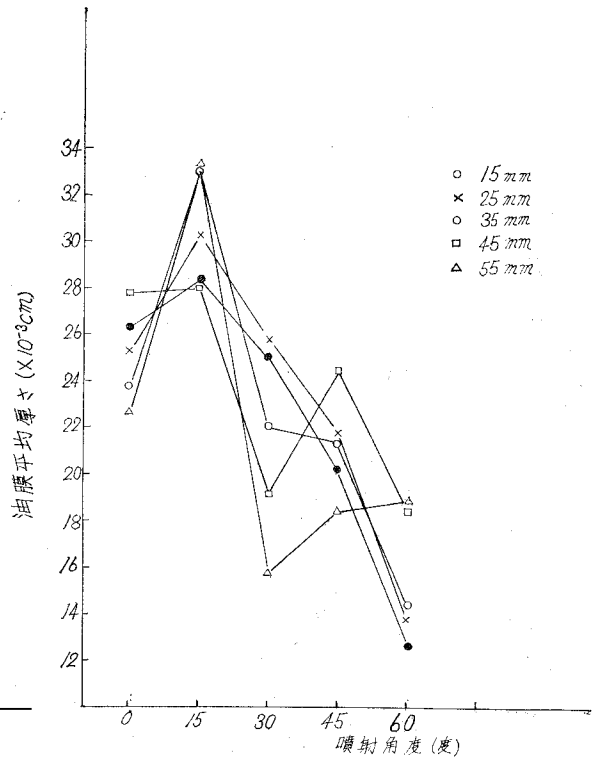


図-11 平板無風時に於ける  
噴射角度と油膜平均厚さ

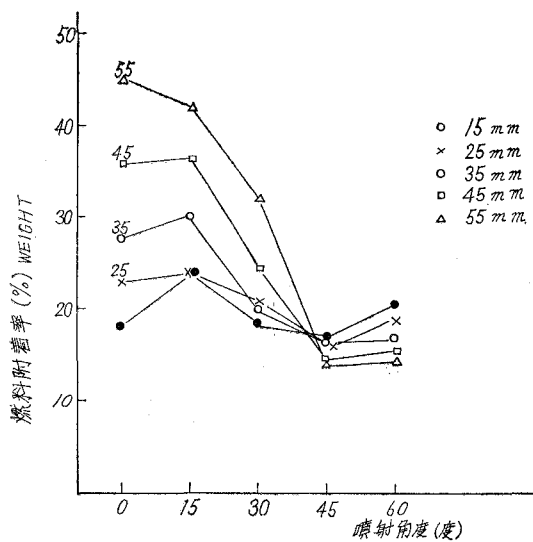


図-12 平板有風時に於ける噴射角と附着率

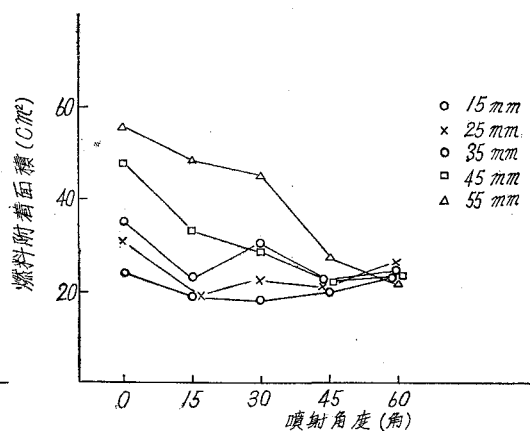


図-13 平板有風時に於ける噴射角と附着面積

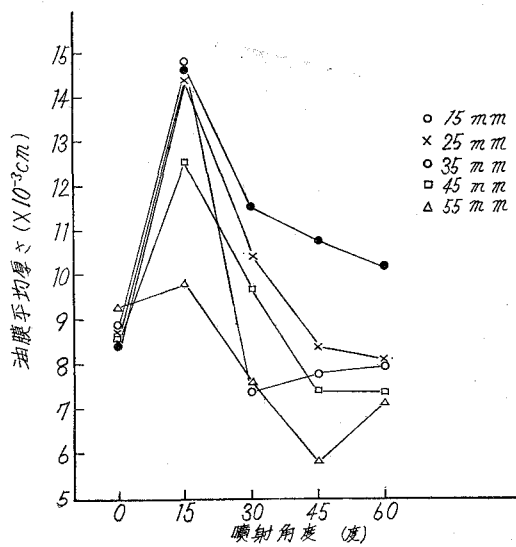
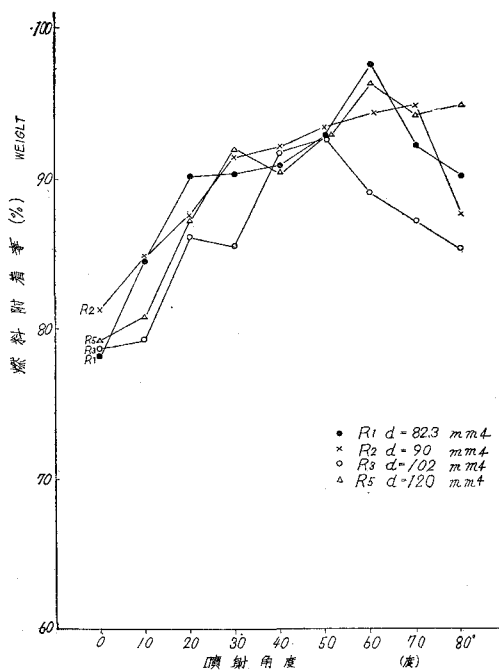
図-14 平板選風時に於ける  
巨りと油膜平均厚さ

図-15 噴射角度と附着率の関係

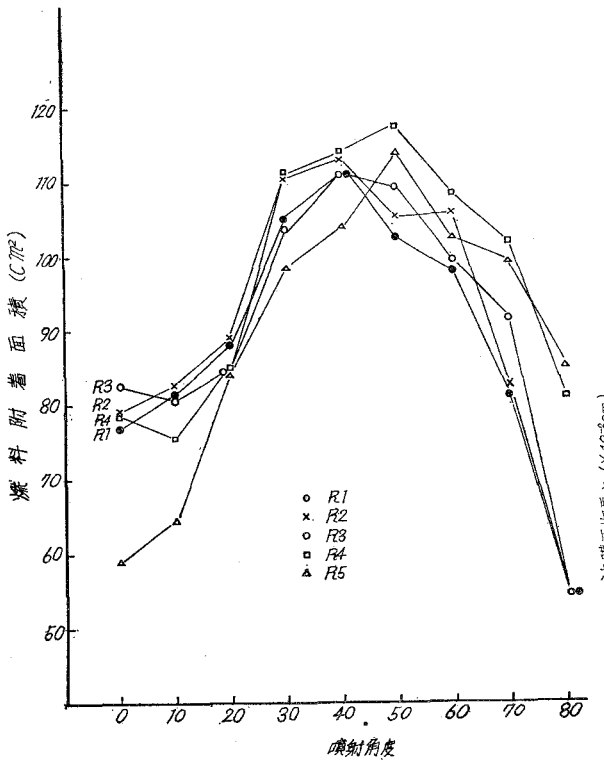


図-16 円管に於ける噴射角度と附着面積

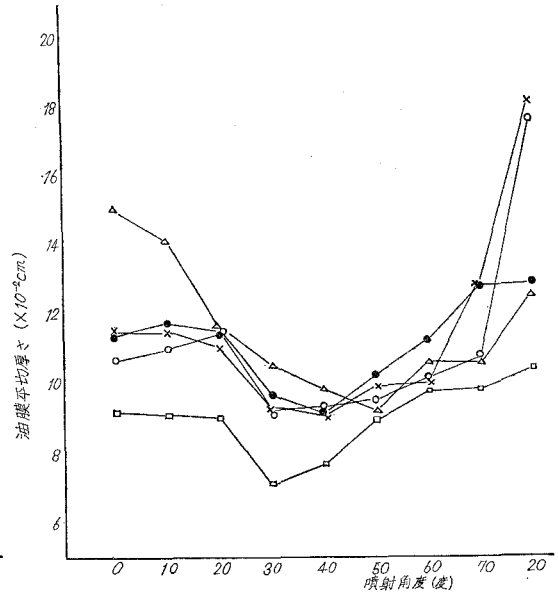


図-17 円管に於ける噴射角度と油膜平均厚さ

影響を受けていない、また噴射角度の大きい場合も影響は少ない様である。図示すれば図-14の如くなり計算によって求めた油膜平均厚さも無風時に対して30~50%小となっている。またいずれの場合も15°附近で厚さは最大となっている。

燃量の附着におよぼす条件として大きな因子となるものの一つに、燃焼室の形状が考へられるが、我々はこれを円管を横置きとした場合について実験を行ったのであるが、噴霧が到達する距離は管径と、噴射方向と壁面のなす角度によって決定される。したがって我々は4種類の管径を使用してこの距離を変化させた。その結果を図-15に示す。また角度、管径、および到達距離の関係を表-1に示す。

円管における附着量は平板の場合と比較すると非常

に大きな値を示し、60°附近で94%~98%であり最小値0°の附着率80%は、平板における最大値に対しての値と同じである。噴射角度と附着面積の関係を図-16、図-17に示すとノズル角に相似の曲線を見出す。平板の最大値と比較すると高い方で約250%11.5cm<sup>2</sup>、小さい方で150%

表1 円管の噴射角度と距離

管径 角度	82.3	90.0	102.0	120.0
0	82.3	90.0	102.0	120.0
10	80.65	88.2	99.96	117.6
20	77.36	84.6	95.88	112.8
30	71.60	78.3	88.74	104.4
40	63.37	69.3	78.54	92.4
50	52.67	57.6	65.28	76.8
60	41.15	45.0	51.0	60.0
70	27.98	30.6	34.68	40.8
80	13.99	15.3	17.34	20.4

5.5cm<sup>2</sup>といずれも増加している。計算によって得た油膜平均厚さは30°~50°で最小値9×10<sup>-3</sup>cmで我々の実験範囲では距離との関連性は少ないと思われるが、平板と同様に距離小のものが幾分厚いようである。平板と比較して約50%位の値である。

今平板において噴射角0°の場合について噴霧円錐の附着面積と到達距離hとの関係を求めてみる。

$$r = h \tan \beta$$

r: 円錐断面の半径

β: 円錐の頂角×1/2

$$S = \pi r^2 = \pi h^2 \tan^2 \beta$$

S: 円錐の断面積

これより数値計算を行いhとsの関係を図示すると図-18となる。従って噴霧角βが決ればhについて2次曲線となる。然るに実験により得た値は(図-8)45mmを誤差とみて直線とみられる。これより測定して図-18に加へて次の直線の式を得た。

$$S = ah + b = 4.4h + 200$$

ここにおいて噴口直前では理論的にS=0でなければならないのにh=0において200mm<sup>2</sup>の面積を有する事は燃料の速度のエネルギーにより壁面に押し流されたためであると考えられる。この押し流す力を考慮して速度のエネルギーにより拡がる面積をXとすれば実際の面積は計算から

$$S' = \pi h^2 \tan^2 \beta + x$$

となるべきである。この力を考へない場合はx=0のときである。

$$\text{即ち } S = 4.4h + 200 = \pi h^2 \tan^2 \beta + x$$

の関係が出来る。ここではxにより影響を受けるものであることが分る。

$$x = 4.4h + 200 - \pi h^2 \tan^2 \beta$$

## 2) 蒸発時間に関する考察

加熱面に燃料が噴射された場合、一部は空中に浮遊して混合気を形成し、残りの部分は一旦壁面に附着して徐々に蒸発しながら混合気を形成する。

蒸発時間の測定にはこの浮遊した噴霧のために直接測定することは困難であったので、前報告<sup>4)</sup>による熱伝導の一般式によって計算上の数値を求め、更にこの混合気を燃焼させてその燃焼時間を油膜の蒸発時間とした。着火は燃料附着面の上方10mmに点火源の小火焰を置いた。両者の関係を各噴射角度毎に分類して考へ比較してみると図-19, 図-20, 図-21, 図-22, 図-23の如くなり、約2桁のオーダーの相違がある。これを各温度について油膜厚さと燃焼時間の関係を図-24に表してみたが0.12mm~0.28mm程度の厚さにおいて2×10<sup>-2</sup>secの差におさまリ、平均8×10<sup>-2</sup>secで一定の値を示し両者の間にはあまり関連性がないものと考えられる。図中蒸発時間とあるのは、焰による輻射熱および対流によってなされる熱伝達は考慮せず壁面からの伝達熱のみとして計算した場合である。

また燃焼時間は燃料が蒸発して混合気を形成して燃焼すると考えられることから燃焼時間即ち蒸発時間と考へた場合であり燃料の化学的变化速度を考慮にいれなければ当然燃料の受けた蒸発熱量は、

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$\text{こゝで } Q_1 = \alpha_w (\theta_1 - \theta_2) \cdot s \cdot t$$

$$Q_2 = \alpha_f (\theta_3 - \theta_2) \cdot s \cdot t$$

$$Q_3 = s \cdot t \cdot c \left[ \left( \frac{\theta_3}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_2}{100} \right)^4 \right]$$

$$\therefore Q = \left\{ \alpha_w (\theta_1 - \theta_2) + \alpha_f (\theta_3 - \theta_2) + c \left[ \left( \frac{\theta_3}{100} \right)^4 - \left( \frac{\theta_2}{100} \right)^4 \right] \right\} s \cdot t$$

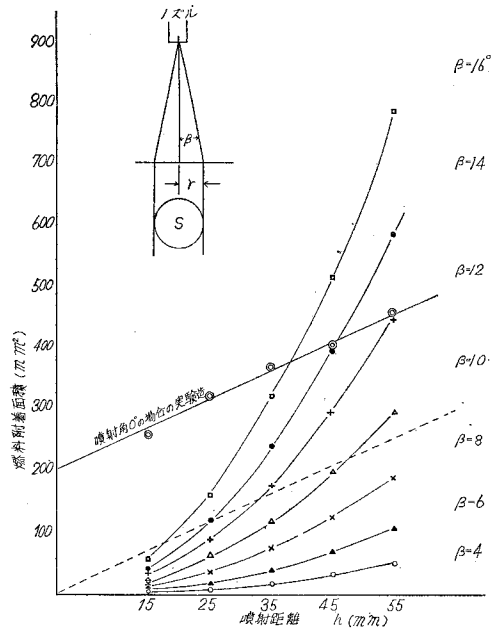


図-18 理論附着面積

によって表はされると思はれるが、これについては尚検討中である。

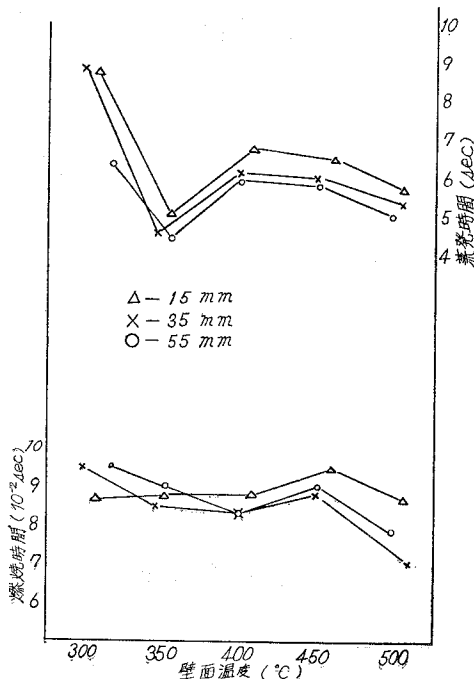


図-19 平板に於ける(0°)  
壁面温度と蒸発燃焼時間

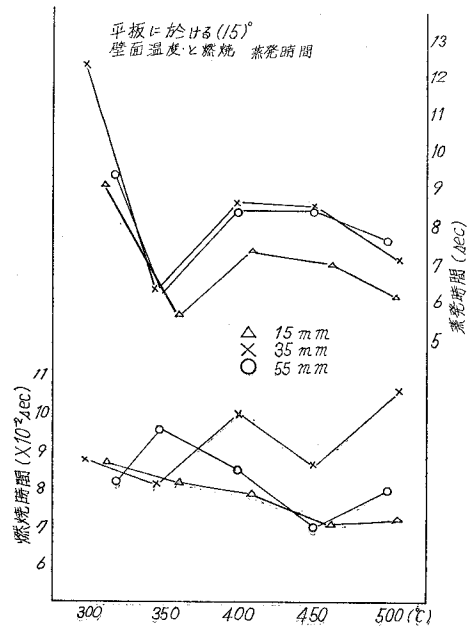


図-20 平板に於ける(15°)  
壁面温度と燃焼蒸発時間

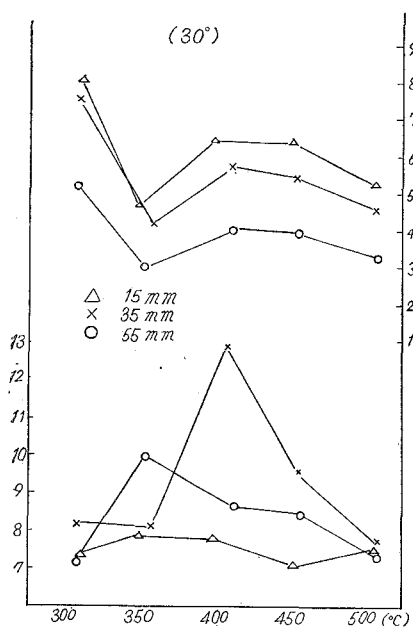


図-21 平板に於ける(30°)

壁面温度と蒸発燃焼時間

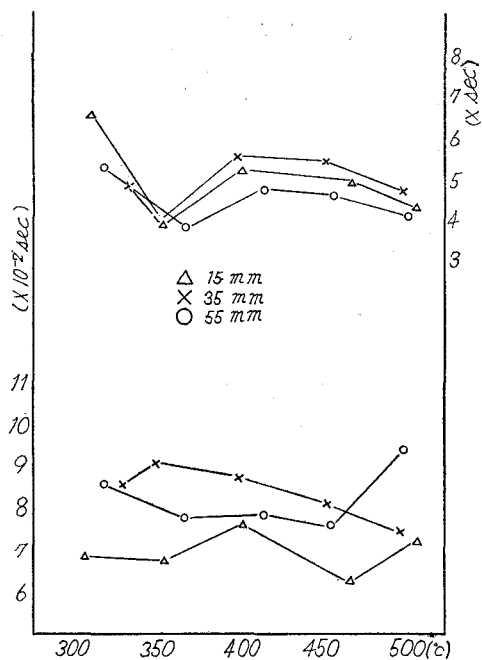


図-22 平板に於ける(45°)

壁面温度と蒸発燃焼時間

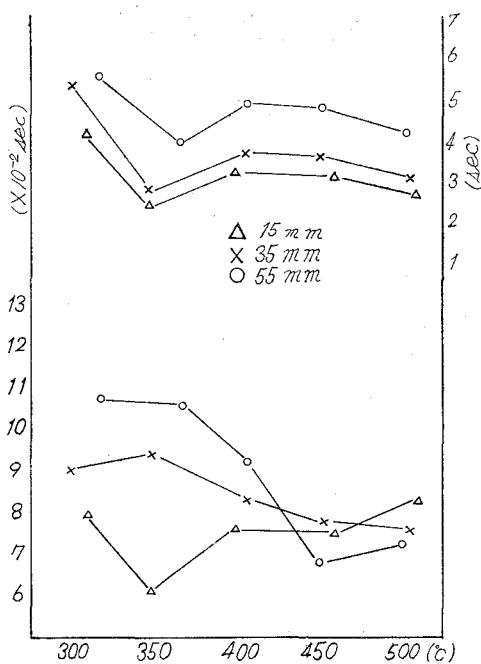


図-23 平板に於ける(60°)

壁面温度と蒸発燃焼時間

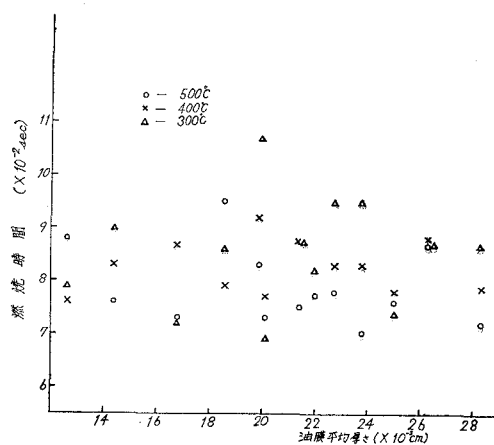


図-24 油膜平均厚さと燃焼時間

$\theta_1$ : 壁面温度	$\theta^2$ : 燃料温度	$\theta_3$ : 火焰温度
$\alpha_w$ : 燃料の熱伝達率	$\alpha_f$ : 火焰から油膜への熱伝達率	$c$ : 輻射係数
$s$ : 受熱平均面積	$t$ : 受熱時間	$Q_3$ : 焰から受けた熱伝達量
$Q$ : 油膜蒸発熱量	$Q_1$ : 壁面より受ける熱量	$Q_2$ : 輻射熱量

#### IV 結 論

本実験では Meurer 燃焼の一部を受け持つ、壁面での燃料の蒸発がいかなることに影響されるかの基本について測定したもので、ノズルの角度および距離が燃量附着量とどのような関係にあるか、附着面積との関係を求め、それらが燃焼壁面とどのような関連をもって蒸発に影響を及ぼすか、をもとめたものであり、実際機関についてはもっと複雑な因子を含んでいる。つぎの段階では、これらを基礎として実際機関の運転による測定を続けて行く予定であるが、現段階で得られた結果からの結論をのべると、

1) 微粒化された液体燃料が壁面に噴射された場合、一種の弾性体となって反射をおこすが、一部は反射されて空気中に浮遊し、または壁面到達以前に速度を失い空気中にそのまま浮遊する。これらが油膜蒸発以前に混合気を形成し火焰核を生ずると考へられる。他の残りはそのまま壁面に附着して、その後徐々に蒸発しながら混合気を形成していくのであるが、両者の比率は燃焼室の形状が最大の因子をなしており、平板の場合噴射角度が小さい時には附着量が多きく60%~90%の値を示すが噴射角度が大きくなるにしたがって附着量は減少し70°, 80°ではほとんどの燃料が散って僅かに10~20%が附着するのみである。円管においては角度大となるに従って附着率は大きくなる。その値は約95%位を示している。これは粒子のもつ速度エネルギーが壁面の形状と相俟って押しつけ効果の働きによるものである。

2) 附着面積については、燃焼室壁面の形状に大きく影響されると同時に、壁面と噴霧のなす角度にも影響される。平板では垂直方向に近づくに従って、その附着面積は大きく、円管では40°~50°附近で最大となるが、到達距離は我々の実験範囲では大きな影響はみられなかった。

3) 以上1), 2) から平均油膜厚さを計算上求めてみた。附着厚さが我々の実験範囲において距離にはあまり関係なく、噴射角と壁面形状がその要因をなすものであり、角度が増すと厚さも増大しており、平板において最大値0.33mm最小値0.06mm、円管においては30°附近で最小値を示し、油膜厚さは0.08~0.13mmである。

4) 壁面に附着した燃料が蒸発するには、壁面からの熱と火焰からの輻射熱、又は空気の流れによる熱伝達が重なってなされているが蒸発燃焼時間は、火焰の熱放射および火焰の流れによる熱伝達又は物質移動の方が大きく影響している。蒸発燃焼時間はこのような噴霧油膜においては油膜厚さ、壁温にはあまり影響されない。



以上実験を行ったことがらを基礎として、次の段階では、圧力、渦流、各壁温における炭素分子の分解等が大きな課題となる。緩慢な燃焼をおこして、如何なる時間に燃え尽くすのが最適であるかは、やはり実物機関での実験にまつほかはない訳であり、続けてこれらのことを解明して行き度いと思っている。

最後に本実験に終止御教示頂いた北大工学部黒岩教授に謝するとともに、本学々生金子徹、佐藤嘉泰、横沢日出男の諸君、ならびに内燃機実験室の早川友吉氏のたゆまぬ測定、装置の製作の御援助に厚く御礼申します。

#### 文 献

- 1) Meurer: SAE Golden Anniversary Summer Meeting 1955  
MTZ 1954 April P. 105
- 2) Tanazawa 他: 7th Symposium on Combustion
- 3) Hussmann, A. W. : The Film Vaporization Combustor
- 4) 赤木盈, 林重信: デーゼル機関における表面蒸発燃焼に関する基礎実験  
室工大研報 Vol. 4 No. 1 日本機械学会北海道支部 1962. 10
- 5) International Cristal Table
- 6) Spalding, D, B.: Some Fundamentals of Combustion
- 7) Clarke, T. S.: Initiation and some controlling parameters of combustion in the piston Engine.  
Proc Instn Mech Engrs. No. 5 1960-61